

Procesado y compresión de secuencias termográficas basados en el momento estadístico de cuarto orden, kurtosis

P. Albendea ⁽¹⁾, Francisco J. Madruga ⁽¹⁾, P.B.García-Allende ⁽¹⁾, Clemente Ibarra ⁽²⁾, José M. López-Higuera ⁽¹⁾
albendeap@unican.es

⁽¹⁾ Grupo de Ingeniería Fotónica, Universidad de Cantabria, ETSIIT - Avda. Los Castros s/n, 39005 Santander, España.

⁽²⁾ Computer Vision And Systems Laboratory, Université Laval, G1V 0V6 Quebec City, Canada.

Abstract- The automatic detection of subsurface defects has become a desired goal in the application of non-destructive testing and evaluation techniques. In this paper, an algorithm based on the fourth order standardised statistic moment, i.e. kurtosis, is proposed for detection and/or characterization of subsurface defects having a thermal diffusivity either higher or lower than the host material. The analysis of thermographic data can be reduced to the temporal statistics of the thermographic sequence and provides a single image showing the different defects without the necessity of establishing other evaluating parameters such as the delayed time of the first image or the acquisition frequency in the analysis, which are required in other processing techniques. All the information is contained in a single image allowing to discriminate between the defect types (high or low thermal diffusivity). Synthetic data from Thermocalc® using a Plexiglas™ and Steel specimens are showed for validating the processed method.

I. INTRODUCCIÓN

La inspección térmica es una técnica útil para el ensayo y evaluación no destructivos (NDT&E) de materiales y sistemas. La termografía infrarroja activa ofrece medios fiables, sencillos y rápidos para la recuperación de información estructural de especímenes¹. Concretamente, la técnica de termografía pulsada es capaz de detectar defectos en amplias áreas de forma rápida (unos pocos segundos o minutos), entendiéndose por defecto una inhomogeneidad en un material debida a la inclusión de otro material, a burbujas de aire o a falta de adhesivo en materiales composites, entre otras causas. Esta técnica se basa en la detección de anomalías que aparecen como cambios en la temperatura superficial de un espécimen en respuesta a la aplicación de un pulso térmico. La evolución temporal de la temperatura de la superficie se almacena en una secuencia termográfica de imágenes (termogramas) usando una cámara infrarroja como se muestra en la Fig.1.

Una secuencia termográfica se compone de cientos de termogramas. Para hacerse una idea de la cantidad de datos generados en un experimento pulsado, una matriz de termogramas que contenga 1200 imágenes con un tamaño de 320x240 píxeles y un rango dinámico de 14 bits, requiere 175Mbytes de memoria para almacenarla. Varios algoritmos de procesamiento de señal pueden ayudar a comprimir la información termográfica contenida en la secuencia, algunos de los cuales se basan en la asunción de que los perfiles de

temperatura en los píxeles sin defecto deben seguir la curva de decaimiento dada por la solución unidimensional de la ecuación de Fourier para la función Delta de Dirac en un sólido isotrópico semi-infinito, que viene dada por²:

$$T(z, t) = T_0 + \frac{Q}{\sqrt{k \cdot \rho \cdot C_p \cdot \pi \cdot t}} \exp\left(-\frac{z^2}{4 \cdot \alpha \cdot t}\right) \quad (1)$$

donde Q es la energía absorbida por al superficie, T_0 es la temperatura inicial, ρ es la densidad del material, k y α son la conductividad y difusividad respectivamente, C_p es el calor específico, z la profundidad y t el tiempo.

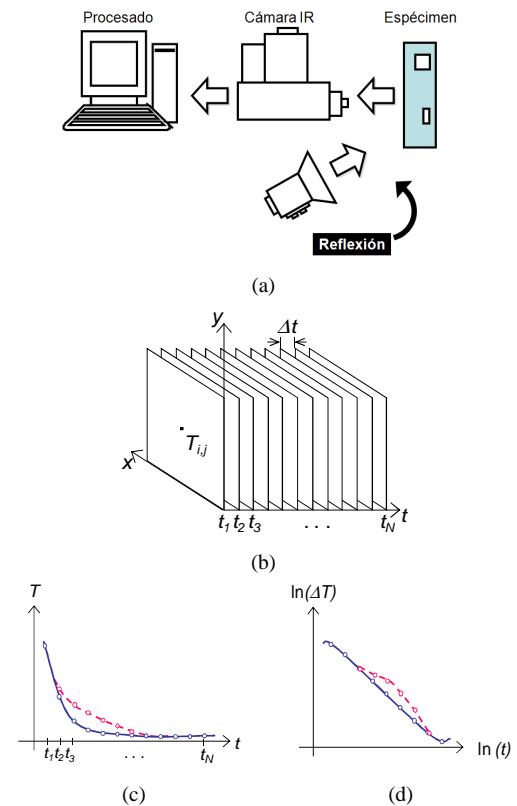


Fig. 1. (a) Montaje típico de termografía pulsada, (b) secuencia de termogramas obtenida de una inspección pulsada, (c) evolución temporal de la temperatura superficial de un píxel con defecto (--) y sin defecto (—) y (d) misma evolución temporal en escala logarítmica.

Esta evolución térmica puede ser definida como una distribución estadística de valores de temperatura de cuyo estudio se puede obtener la presencia o no de defectos.

Este artículo investiga el rendimiento del parámetro estadístico de cuarto orden, llamado kurtosis, aplicado a la inspección por termografía pulsada. El parámetro kurtosis se ha usado en el procesado de datos generados sintéticamente y muestra un mayor contraste en los defectos en relación con los datos procesados y mayores capacidades de compresión, ya que la información contenida en la secuencia de datos procesada, de más de 1000 imágenes, se comprime a una única imagen final.

II. PARÁMETROS ESTADÍSTICOS EN INSPECCIONES TERMOGRÁFICAS

Para una inspección termográfica debemos estudiar la evolución de la temperatura superficial del espécimen en cuestión, que se da en la superficie $z=0$, con lo que la Ec. (1)¹ se puede reescribir como:

$$T(z=0, t) = T_0 + \frac{Q}{\sqrt{k \cdot \rho \cdot C_p \cdot \pi \cdot t}} = T_0 + \frac{Q}{e \sqrt{\pi \cdot t}} \quad (2)$$

donde $e \equiv (k \rho C_p)^{1/2}$ [m] es la efusividad, una propiedad térmica que mide la habilidad de un material para intercambiar calor con el entorno.

La Fig.1c muestra la curva de decaimiento de temperatura descrita por la Ec. (2) para un píxel sin defecto y uno con defecto. La curva de decaimiento para un píxel sin defecto puede aproximarse como la raíz cuadrada del tiempo mientras que el perfil para un píxel con defecto es diferente. La evolución de temperatura para ambos píxeles, con y sin defecto, puede representarse como una distribución estadística de los valores de temperatura y sus diferentes frecuencias de aparición. Por ejemplo, usando los datos presentados en la Tabla 1, los histogramas para píxeles con y sin defectos muestran una distribución como la de la Fig.2 (a y b). Las diferencias en las distribuciones pueden describirse cuantitativamente usando medidas de variabilidad o estadísticas como la desviación típica o los momentos centrales de orden superior.

Valor temperatura	0.15	0.16	0.17	0.18	0.19	0.20	0.21	0.22	0.23
Frecuencia Def.	9	567	353	94	42	25	18	15	12
Frec. No-Def.	580	379	64	34	25	18	15	12	11

Tabla 1. Tabla de valor temperatura-frecuencia.

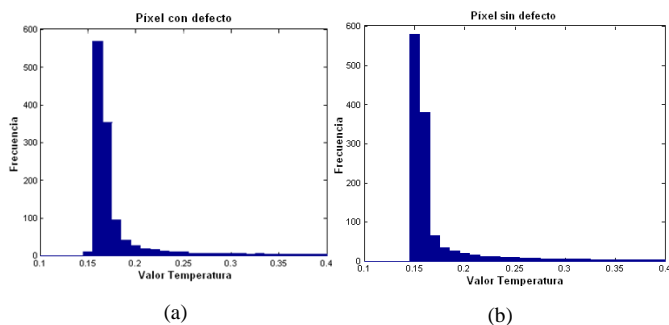


Fig. 2. Histogramas de píxeles (a) con y (b) sin defectos.

El cuarto momento central estandarizado, o kurtosis, se define como una medida que analiza el grado de concentración que presentan los valores de una variable alrededor de la zona central de su distribución. Concretamente, el parámetro kurtosis proporciona información referente a la altura de la distribución en relación con el valor de su desviación típica.

Matemáticamente viene dado por³:

$$K = \frac{E[(X - E[X])^4]}{\sigma^4} \quad (3)$$

donde E es la esperanza matemática y σ la desviación típica.

Así, los valores de kurtosis pueden clasificarse en tres categorías generales de acuerdo a su derivación de una distribución normal:

- *Mesokúrtica*: presenta un grado de concentración medio alrededor de los valores centrales de la variable (el mismo que presenta una distribución normal).
- *Leptokúrtica*: presenta un elevado grado de concentración alrededor de los valores centrales de la variable.
- *Platikúrtica*: presenta un reducido grado de concentración alrededor de los valores centrales de la variable.

La Fig.3 muestra estos tres tipos de distribución. Los valores de sus medias, varianzas y kurtosis se han calculado usando los datos mostrados en la Tabla 2. La distribución A, mostrada en la Fig.3a, muestra una distribución quasi-normal y su valor de kurtosis es cercano a 3. La distribución B (Fig.3b) tiene el valor más alto de kurtosis (mayor que 3) típico de una distribución leptokúrtica, mientras que la distribución C (Fig.3c) presenta el valor de kurtosis más pequeño (menor que 3) típico de una distribución platikúrtica.

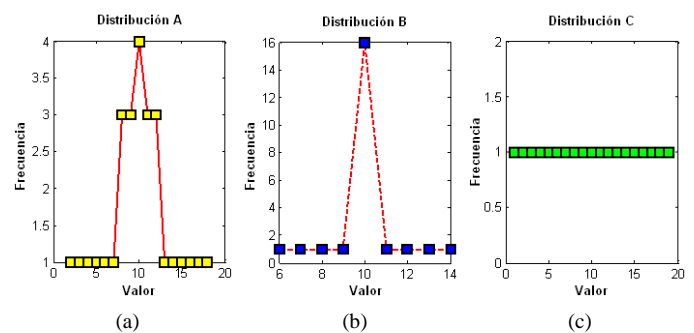


Fig. 3. Ejemplo de distribuciones (a) mesokúrtica, (b) leptokúrtica, y (c) platikúrtica.

Distribución	Valor de Distribución	Media	Varianza	Kurtosis
A mesokúrtica	2 3 4 5 6 7 8 8 8 9 9 9 10 10 10 11 11 11 12 12 12 13 14 15 16 17 18	10	15.8519	2.6920
B leptokúrtica	6 7 8 9 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 11 12 13 14	10	2.6087	4.7200
C platikúrtica	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19	10	31.6667	1.7933

Tabla 2. Ejemplo de distribuciones normal (distribución A) y con alto y bajo grado de concentración (distribuciones B y C).

La evolución de la temperatura superficial en un área sin defecto después de un ensayo de termografía pulsada sigue una distribución leptokúrtica, donde la temperatura ambiente presenta la mayor frecuencia, como se observa en la Fig.2. El valor de kurtosis en este caso es mucho mayor que 3. Para una zona con defecto la temperatura superficial presentará mayores o menores frecuencias al valor de temperatura ambiente dependiendo de la difusividad del material defectuoso. Para un defecto que tenga mayor difusividad térmica que el material que lo aloja, la distribución será más picuda y el valor de kurtosis será mayor para píxeles con defecto que píxeles sin defecto. Por el contrario, la distribución tendrá un pico más ancho y el valor de kurtosis será menor para un píxel con defecto que para uno sin defecto para los casos en que los defectos sean de una material de menor difusividad que el material que los aloja. Usando esta idea, es posible estimar los valores de kurtosis para cada píxel de la matriz de termogramas y obtener una imagen con estos valores, que llamaremos kurtograma. El kurtograma proporcionará información primeramente de la localización de defectos superficiales eventuales, y en segundo lugar de su difusividad térmica.

III. SIMULACIONES

Para evaluar la dependencia del valor de kurtosis con la profundidad y difusividad térmica de los defectos, se han simulado diferentes secuencias termográficas usando el software Thermocalc®⁴ obteniendo de forma sintética los datos que se obtendrían de una captura con cámara termográfica. Se han simulado cuatro especímenes, dos de Plexiglas™ (especímenes P1 y P2) y dos de acero (A1 y A2), que contienen cada uno de ellos seis defectos posicionados tal y como se muestra en la Fig.4. Los especímenes P1 y A1 tienen todos los defectos a la misma profundidad generados con un material de diferente difusividad para cada uno, mientras que los especímenes P2 y A2 tienen los seis defectos a diferentes profundidades y todos del mismo material y por tanto de la misma difusividad, en ambos casos superior a la del material base. Las características de las muestras se resumen en la Tabla 3. Se utiliza como fuente un flash centrado en la superficie para calentar cada muestra para las simulaciones que emite un pulso de luz de 0,01s, obteniendo una secuencia termográfica de 1200 imágenes que son procesadas para obtener una imagen única con los valores de kurtosis de la distribución temporal de la temperatura.

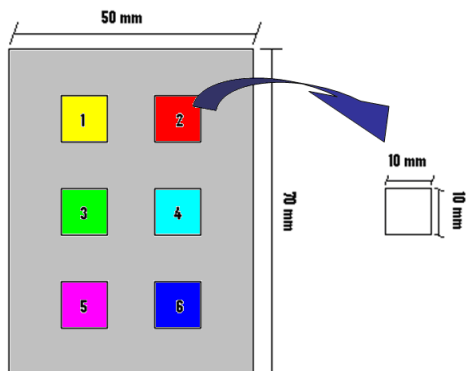


Fig. 4. Distribución de defectos en los especímenes

Especímen	Defectos					
	1		2		3	
	$\alpha \times 10^{-7}$ [m ² /s]	z [mm]	$\alpha \times 10^{-7}$ [m ² /s]	z [mm]	$\alpha \times 10^{-7}$ [m ² /s]	z [mm]
P1, A1	1.1	0.5	40	0.5	200	0.5
P2, A2	400	0.5	400	1	400	1.5
	4		5		6	
P1, A1	240	0.5	400	0.5	971	0.5
P2, A2	400	2	400	2.5	400	3

*Material base: $\alpha=1.1 \times 10^{-7}$ m²/s (Plexiglas)

*Material base: $\alpha=39 \times 10^{-7}$ m²/s (Acero)

Tabla 3. Características de los especímenes simulados en las Fig.5 y 6.

Las secuencias sintéticas obtenidas a partir del software Thermocalc® han sido procesadas para obtener los parámetros estadísticos utilizados para la detección de defectos.

Las Fig.5 y 6 muestran las imágenes de los valores de kurtosis para cada espécimen de cada uno de los dos materiales base. Como se puede apreciar, en los defectos simulados con mayor o igual difusividad térmica que la del material que los aloja el valor de kurtosis es mayor para los defectos que para el material base. Por el contrario, para defectos que tienen una difusividad menor o igual que la del material que los aloja, el valor de kurtosis es menor. Para los especímenes P2 y A2, se han simulado defectos con difusividades térmicas mayores que la del material base pero ubicados a diferentes profundidades para analizar el impacto de la profundidad en el valor de kurtosis. En los casos en que la difusividad del material del defecto es muy superior a la del material base y el defecto es muy superficial, los resultados obtenidos pueden ser erróneos si el tiempo de muestreo entre imágenes es superior al tiempo que tarda la onda de calor en llegar al defecto, como ocurre con el primer defecto de la Fig.5 (b) que no sigue el patrón esperado, a diferencia de los restantes que presentan una tendencia común.

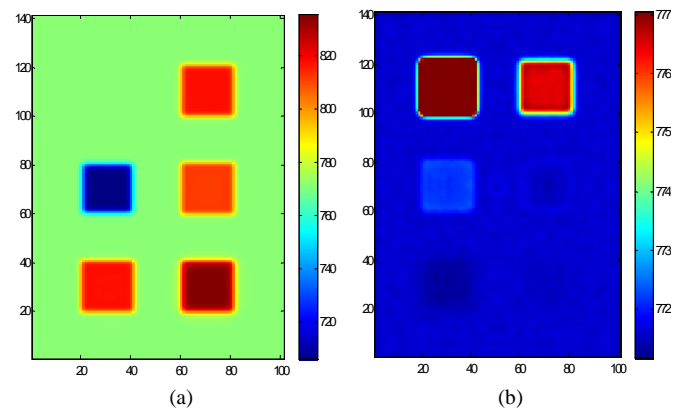


Fig. 5. Kurtogramas obtenidos de: (a) espécimen P1 con defectos simulados de difusividades diferentes a la del plexiglás, y (b) espécimen P2 con defectos simulados de una difusividad mayor que la del plexiglás y a diversas profundidades.

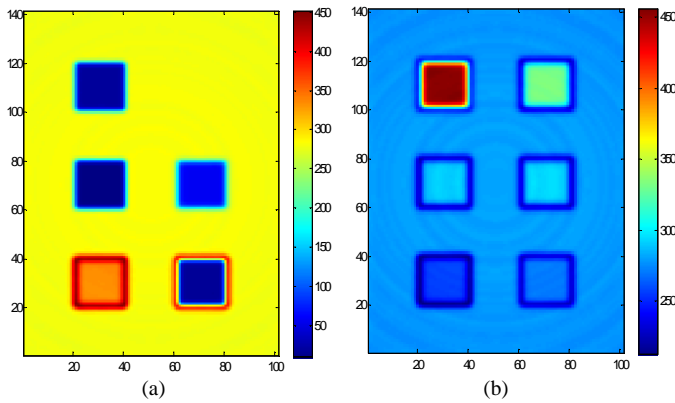


Fig. 6. Kurtogramas obtenidos de: (a) espécimen A1 con defectos simulados de difusividades diferentes a la del acero, y (b) espécimen A2 con defectos simulados de una difusividad mayor que la del acero y a diversas profundidades.

En la Tabla 4 se recogen los valores medios del parámetro kurtosis en las áreas cubiertas por cada uno de los defectos en comparación con el valor medio para un área sin defecto, para cada una de las cuatro simulaciones. En las Fig.7 y 8 pueden observarse los resultados obtenidos de forma gráfica. De estos resultados se deduce que el valor de Kurtosis es función de ambos, la profundidad del defecto y la difusividad térmica de su material.

		DEFECTO 1	DEFECTO 2	DEFECTO 3	DEFECTO 4	DEFECTO 5	DEFECTO 6	ÁREA SIN DEF.
PLEXIGLAS	P1	771,6230	816,5880	711,6526	811,2256	816,7943	832,7090	771,6044
	P2	816,6049	776,5486	772,2090	771,5923	771,3771	771,5660	771,5926
ACERO	A1	37,4323	281,9015	23,7924	80,2802	363,8134	78,0226	279,2647
	A2	471,0818	311,3582	277,6653	280,0886	246,8649	261,8441	278,1354

Tabla 4. Valores medios del parámetro kurtosis en áreas con y sin defecto

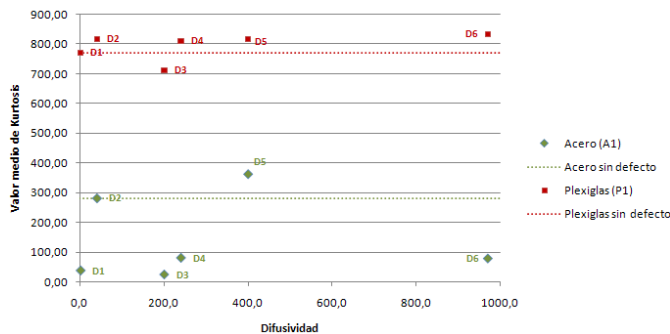


Fig. 7. Gráfica del valor medio del parámetro Kurtosis frente a la difusividad del material del defecto para defectos de la misma profundidad.

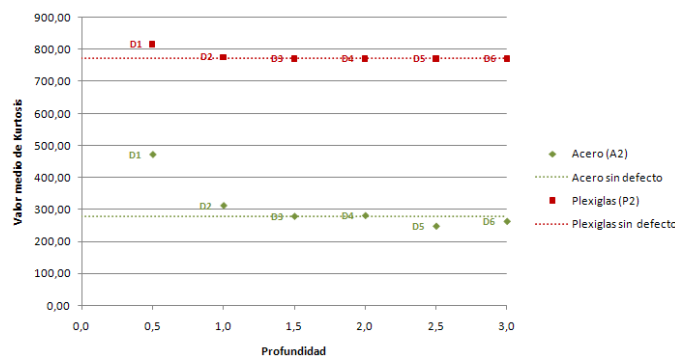


Fig. 8. Gráfica del valor medio del parámetro Kurtosis frente a la profundidad del defecto para defectos del mismo material.

Para interpretar los resultados obtenidos se utiliza el valor de kurtosis para un área sin defecto como referencia, de forma que se sabrá la validez de los datos obtenidos en función de su relación con este valor. Así, en la gráfica de la Fig.7 se observa en el caso del espécimen de plexiglás el valor de kurtosis obtenido para el defecto 3 (D3) que no sigue la tendencia esperada (ver Fig.5 (a)). Su valor se encuentra por debajo del típico para una zona sin defecto y por lo tanto no puede considerarse válido. Para el espécimen de acero en cambio, es el defecto 5 (D5) el que se sale del patrón de comportamiento y supera el valor de referencia (ver Fig.6 (a)), por lo que el resultado tampoco puede considerarse bueno. Estos errores se deben a la no convergencia del cálculo de la secuencia de calor en el programa de simulación Thermocalc®. En la gráfica de la Fig.8, los defectos cuyo valor medio de kurtosis se encuentra por debajo de la correspondiente referencia de un área sin defecto no proporcionan resultados válidos ya que se ven muy afectados por el ruido. Al ser defectos demasiado profundos, se confunden con el final del espécimen y la relación señal a ruido es muy pequeña. Este es el caso de los defectos 4, 5 y 6 (D4, D5 y D6) de ambos especímenes (ver Fig.5 (b) y Fig.6 (b)).

IV. CONCLUSIONES

El método propuesto basado en el parámetro estadístico de kurtosis ha demostrado ser una herramienta prometedora en la detección de defectos subsuperficiales con termografía pulsada. El cálculo del parámetro kurtosis puede verse como un proceso de compresión de la secuencia termográfica a una única imagen, la cual muestra mayor contraste en la detección de defectos en comparación con otras técnicas del campo de la termografía pulsada. Una característica interesante de la técnica kurtosis es que ofrece la posibilidad de procesar los datos de la termografía pulsada de una forma completamente automatizada. Para las secuencias simuladas se ha comprobado el rendimiento (comportamiento) de la técnica ante variaciones de profundidad y difusividad del material de los defectos.

Resumiendo, la técnica propuesta proporciona un método automático que puede ser usado para comprimir los datos (en una única imagen) de las grandes matrices 3D típicas de experimentos de termografía activa y para lograr mayor contraste en la detección de defectos en materiales cuya difusividad sea mayor que la del material que los aloja.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo está respaldado por el Ministerio Español de Ciencia y Tecnología bajo el proyecto PSS TEC2007-67987-C02-01.

REFERENCIAS

- [1] X. P. V. Maldague, "Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing" (Wiley-Interscience, April 2001).
- [2] C. Ibarra-Castanedo and X. Maldague, "Pulsed phase thermography reviewed", in Quantitative Infrared Thermography (QIRT) Journal, 2004), Vol. 1, p. 47.
- [3] O. Holub and S. T. Ferreira, "Quantitative histogram analysis of images", Computer Physics Communications 175, 620 (2006).
- [4] "Thermocalc 3D Software manual", in Institute of Introscopy, Tomsk Polytechnic, Russia, 1998).